

分类号: O657.3  
学号: 20212109030

密级: 内部1年  
单位代码: 10759

# 石河子大学

## 硕士学位论文



### 基于可见近红外光谱柑橘糖度及 含水率检测研究

学位申请人	时如意
指导教师	李利桥 副教授 马永平 工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	机械
研究领域	农业机械化工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子  
2024年5月

分类号: O657.3  
学号: 20212109030

密级: 内部1年  
单位代码: 10759

# 石河子大学

## 硕士学位论文



### 基于可见近红外光谱柑橘糖度及 含水率检测研究

学位申请人	时如意
指导教师	李利桥 副教授 马永平 工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	机械
研究领域	农业机械化工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子

2024年5月

**Detection of citrus sugar content and water content based on visible  
near infrared spectroscopy**

A Dissertation Submitted to

**Shihezi University**

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

**Master of Engineering**

**By**

**Shi Ru-yi**

**(Agricultural Mechanization Engineering)**

Dissertation Supervisor: Prof. Li Li-qiao

Engineer. Ma Yong-ping

May, 2024

# 石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

## 学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名： 时如意

时间： 2024 年 5 月 15 日

## 使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名： 时如意

时间： 2024 年 5 月 15 日

导师签名： 李利桥

时间： 2024 年 5 月 15 日

## 摘 要

柑橘作为中国第一大水果，无论是产量还是种植面积相较于其他水果都处于领先地位。糖度和含水率作为柑橘内在品质的重要评价指标，低糖汁少的柑橘品尝起来味道寡淡、难以咀嚼，高糖汁多的柑橘则香甜爽口，更受消费者喜爱，因此检测柑橘糖度与含水率尤为重要，目前现有检测方法大多存在准确率低、破坏性检测等问题，如何实现糖度与含水率无损检测具有重要意义。本文研究开发了一种可见近红外光谱动态采集装置，以云南金牛橘为研究对象，采集其光谱数据，分别建立糖度与含水率定量分析模型，并对模型参数进行优化，从而实现柑橘糖度与含水率指标的无损检测。本文的主要研究内容与相关结论如下：

1.搭建了以柑橘为试验对象的可见近红外光谱动态采集装置，其主要由输送单元、光照单元、采集单元、触发单元组成。该装置可在不同光源功率条件下，采集试验样本在输送速度 0~0.5 m/s 范围内的可见近红外光谱信息。采集预试验样本在不同光源功率、积分时间和输送速度条件下光谱数据，建立对应糖度预测 PLS 模型以及含水率预测 PLS 模型。结果表明：糖度预测时，装置采集参数设置为（光源功率 50 W、积分时间 100 ms、输送速度 0.5 m/s）预测结果最优；在含水率预测时，装置采集参数设置为（光源功率 50 W、积分时间 100 ms、输送速度 0.4 m/s）预测结果最优。

2.分别建立柑橘糖度及含水率预测模型。采集试验样本在上述两种参数组合下的光谱数据。采用不同预处理（MSC、SNV、Smoothing、NOR、1stD）以及多种组合预处理方式结合 SPA、CARS、PCA、RF 四种降维方法处理原始数据，建立 PLS、SVR、BP 预测模型。结果表明：预测糖度时，经 Smoothing+MSC+CARS 处理，PLS 模型预测性能最好， $R_c$  和  $R_p$  分别为 0.913 和 0.881，RMSEC 和 RMSEP 分别为 0.274 和 0.207，RPD 为 2.114；预测含水率时，经 Smoothing+SNV+NOR+CARS 处理，BP 模型预测结果最优， $R_c$  和  $R_p$  分别为 0.911 和 0.895，RMSEC 和 RMSEP 分别为 0.179 和 0.111，RPD 为 2.242。

3.使用网格算法、粒子群算法（PSO）、遗传算法（GA）优化 SVR 模型  $c$ 、 $g$  参数 BP 神经网络模型连接节点参数权值  $w$ 、偏置  $b$ ，建立优化后的 SVR、BP 神经网络模型预测糖度与含水率值。研究表明：由网格算法优化，Smoothing+1stD+MSC+CARS 处理，SVR 模型预测糖度准确率最高，其  $R_c$  值、 $R_p$  值、RPD 值分别为 0.954、0.937、2.862，对比 PLS 模型预测准确率明显提高；由粒子群优化算法优化，Smoothing+1stD+SNV+CARS 处理，PSO-SVR 模型预测含水率准确率最高，其  $R_c$  值、 $R_p$  值、RPD 值分别为 0.969、0.919、2.536，对比 BP 模型准确率提高。上述研究结果表明，模型优化可提高柑橘糖度及含水率预测模型的预测精度。

**关键词：**可见近红外光谱；含水率检测；糖度检测；柑橘；模型优化

## Abstract

As the largest fruit in China, citrus is in a leading position compared to other fruits in terms of output and planting area. Sugar content and moisture content are important evaluation indicators of the internal quality of citrus. Citrus with less sugar juice tastes bland and difficult to chew, while citrus with more sugar juice is sweet and refreshing, which is more popular with consumers. Therefore, it is particularly important to detect the sugar content and moisture content of citrus. How to realize non-destructive testing of sugar content and water content is of great significance. In this thesis, a dynamic acquisition device of visible near-infrared spectroscopy was developed. The spectral data of Yunnan Jinniu Tangerine was collected as the research object, and quantitative analysis models of sugar content and water content were established respectively, and the model parameters were optimized, so as to realize non-destructive testing of citrus sugar content and water content indexes.

The main research contents and relevant conclusions of this thesis were as follows:

1. A visible near-infrared spectrum dynamic acquisition device was built with citrus as the test object, mainly composed of conveying unit, illumination unit, acquisition unit and trigger unit. The device can collect the visible near-infrared spectral information of the test sample in the range of 0~0.5 m/s under the condition of different light source intensity. The spectral data of the test samples were collected under the conditions of different light source power, integration time and transmission speed, and the PLS models for sugar content prediction and moisture content prediction were established. The results show that the acquisition parameters (light source power 50 W, integration time 100 ms, transmission speed 0.5 m/s) were the best for sugar content prediction. In the prediction of water content, the acquisition parameters of the device were set as (light source power 50 W, integration time 100 ms, transmission speed 0.4 m/s), and the prediction results are optimal.

2. Establish the prediction models of citrus sugar content and water content respectively. The spectral data of the test samples were collected under the combination of the above two parameters. Different pretreatment methods (MSC, SNV, Smoothing, NOR, 1stD) and a variety of combined pretreatment methods combined with SPA, CARS, PCA, RF four dimensionality reduction methods to process raw data, to establish PLS, SVR, BP prediction models. The results show that the prediction performance of PLS model by Smoothing+MSC+CARS was the best,  $R_c$  and  $R_p$  were 0.913 and 0.881, RMSEC and RMSEP were 0.274 and 0.207, and RPD was 2.114, respectively. When predicting water content, by Smoothing+SNV+Nor+CARS treatment, the BP model has the best prediction results,  $R_c$  and  $R_p$  were 0.911 and 0.895, RMSEC and RMSEP were 0.179 and 0.111, and RPD was 2.242.

3. Grid algorithm, particle swarm optimization (PSO) and genetic algorithm (GA) were used to optimize SVR model c and g parameter BP neural network model to connect node parameter weights w and bias b, and the optimized SVR and BP neural network models were established to predict the sugar content and water content. The results showed that: optimized by mesh algorithm, Smoothing+1stD+MSC+CARS processing, SVR model had the highest accuracy in predicting sugar content, and its Rc value, Rp value and RPD value were 0.954, 0.937 and 2.862, respectively, which was significantly higher than that of PLS model. Optimized by particle optimization algorithm and Smoothing+1stD+SNV+CARS treatment, PSO-SVR model had the highest accuracy in predicting water content, and its Rc value, Rp value and RPD value were 0.969, 0.919 and 2.536, respectively, which was higher than that of BP model. The above results showed that model optimization could improve the stability and prediction accuracy of the prediction model of citrus sugar content and water content.

**Key words:** Visible near infrared spectrum; Moisture content detection; Sugar content detection; Citrus; Model optimization

# 目录

摘 要 .....	I
Abstract .....	II
第 1 章 绪论 .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.2 国内外研究现状及分析 .....	2
1.2.1 水果品质无损检测研究现状 .....	2
1.2.2 水果品质近红外光谱检测国外研究现状 .....	3
1.2.3 水果品质近红外光谱检测国内研究现状 .....	5
1.2.4 总结 .....	8
1.3 研究内容与方法 .....	8
1.3.1 研究目标 .....	8
1.3.2 研究内容 .....	8
1.3.3 研究方法 .....	9
1.3.4 技术路线 .....	10
1.4 本章小结 .....	11
第 2 章 柑橘可见近红外光谱采集装置搭建与测试 .....	12
2.1 可见近红外光谱分析技术 .....	12
2.2 柑橘可见近红外光谱动态采集装置搭建 .....	13
2.2.1 柑橘可见近红外光谱动态采集装置设计目标 .....	13
2.2.2 总体方案设计 .....	13
2.2.3 工作原理 .....	14
2.2.4 输送单元设计 .....	14
2.2.5 光照单元设计 .....	16
2.2.6 采集单元选型 .....	18
2.2.7 触发单元设计 .....	19
2.3 动态采集装置 .....	21
2.4 试验材料及检测仪器 .....	22
2.4.1 试验材料 .....	22
2.4.2 检测仪器 .....	22
2.5 预测模型最优采集参数确定 .....	23
2.5.1 数据采集与处理 .....	24

2.5.2 预测模型 .....	25
2.5.3 预测评价指标 .....	25
2.5.4 糖度检测采集参数确定 .....	25
2.5.5 含水率检测采集参数确定 .....	26
2.6 本章小结 .....	27
第 3 章 柑橘糖度及含水率检测模型建立 .....	29
3.1 试验材料 .....	29
3.2 光谱数据动态采集 .....	29
3.3 异常样本剔除 .....	30
3.4 样品集分类方法确定 .....	31
3.5 不同模型最佳预处理方法确立 .....	33
3.5.1 PLS 模型最佳预处理方法确立 .....	36
3.5.2 SVR 模型最佳预处理方法确立 .....	37
3.5.3 BP 模型最佳预处理方法确立 .....	37
3.6 不同降维处理模型预测结果 .....	38
3.6.1 SPA 降维模型预测结果 .....	38
3.6.2 CARS 降维模型预测结果 .....	40
3.6.3 PCA 降维模型预测结果 .....	42
3.6.4 RF 降维模型预测结果 .....	42
3.7 本章小结 .....	44
第 4 章 柑橘糖度及含水率可见近红外光谱模型优化研究 .....	45
4.1 BP 神经网络模型权值和偏置参数 .....	45
4.2 SVR 模型惩罚因子与核参数 .....	46
4.3 SVR 与 BP 模型参数优化算法 .....	47
4.3.1 网格优化算法 .....	47
4.3.2 粒子群优化算法 .....	47
4.3.3 遗传优化算法 .....	48
4.4 SVR 与 BP 模型优化结果 .....	49
4.4.1 基于网格算法优化 SVR 模型 .....	49
4.4.2 基于粒子群算法优化 SVR、BP 模型 .....	49
4.4.3 基于遗传算法优化 SVR、BP 模型 .....	51
4.5 本章小结 .....	52
第 5 章 结论与展望 .....	53
5.1 结论 .....	53

5.2 展望.....	54
参考文献.....	55
致谢.....	60
作者简介.....	61

## 第 1 章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

柑橘作为世界产量第一大水果，在世界水果产业中占据举足轻重的地位，为全球经济发展做出了不可磨灭的贡献。柑橘作为典型的热带水果，主要分布于南、北纬  $20^{\circ}$  ~  $30^{\circ}$  之间，主要种植于巴西、美国、中国、意大利、以色列等国家。中国作为柑橘的主要生产大国，不仅种植面积位于世界前列，同时柑橘产量也居于世界前茅。根据《中国水果行业现状分析与发展趋势研究报告（2024 年版）》得知，柑橘在中国的水果总产量中占比 17.8%，位居第一。柑橘的种植面积从 2016 年的 2327.6 千公顷逐年增加至 2022 年的 3000 千公顷，产量由 2016 年的 3591.5 万吨逐年增加至 2022 年的 6003.89 万吨。数据表明，不论是中国柑橘的产量还是种植面积都长期保持在一个较高的水平，且呈现出逐年增加的趋势，如图 1-1 所示。

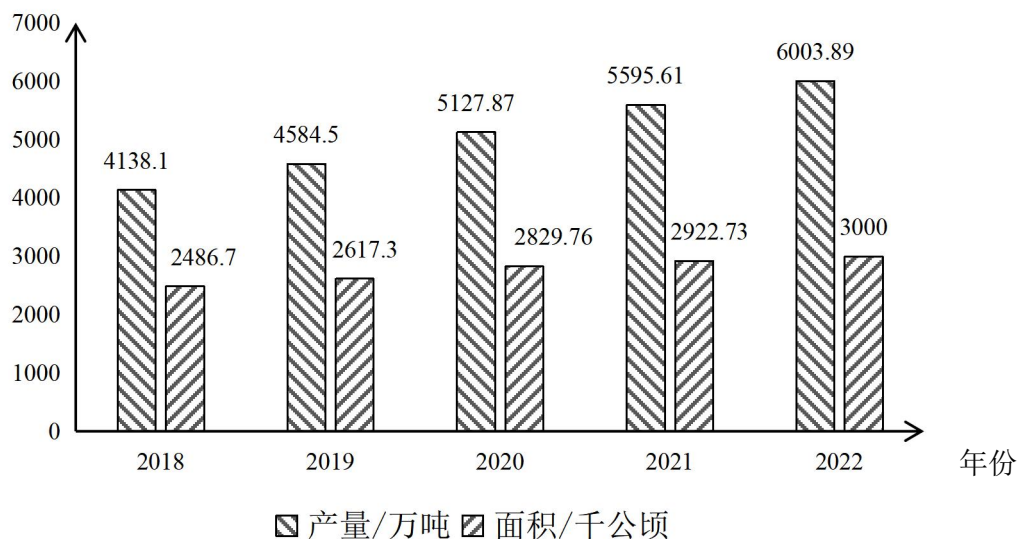


图 1-1 2018-2022 年中国柑橘种植面积

Fig.1-1 Citrus planting area in China 2018-2022

柑橘作为中国第一大水果，富含人体所需的各种营养，其中包含的维生素 C 可提高人体免疫力，抵抗病毒侵害风险；纤维素可促进肠胃蠕动，预防便秘；柠檬酸不仅具有开胃功效，同时还有消除疲劳作用，因此深受广大消费者喜爱<sup>[1-2]</sup>。随着中国经济的不断发展，消费者的消费观已从过去“吃得饱”向“吃得好”转变，消费者在得到市场足量柑橘供应之后，便把目光投向更高的柑橘内在品质、口感、营养与安全方面的要求。

同时根据柑橘内部品质的高低,可实现分级销售,彻底摒弃过去粗犷销售模式,提高果农收入。因此对采收来的柑橘进行内部品质检测迫在眉睫。

目前传统柑橘品质检测方法有人工检测、化学滴定法、机器视觉检测等方法,但大多存在不同的问题。人工检测依靠检测人员多年的从业经验,根据柑橘的颜色、硬度、尺寸大小、表面缺陷等特征进行分类分级,这种分类方法存在着因检测者个体差异造成分类不一致,且工作效率较低,机器视觉通过对采集到的柑橘表面图像进行分析处理,可识别出柑橘表面的一些缺陷特征和损伤,但无法实现对其内部品质检测。而化学滴定法虽然可以检测柑橘的内部品质,但却是破坏性检测,检测完成的柑橘无法实现销售。通过可见近红外光谱分析技术可实现对柑橘快速无损检测<sup>[3]</sup>,光谱分析技术最早发展于20世纪50年代的美国,其工作原理为:近红外光照射待测物时,待测物的内外部特征存在差异,从而对近红外光产生不同程度的吸收或者反射等,使待测物的组成成分和结构特征被反映到相关的近红外光谱图上,进而从光谱上提取出待测物的品质信息,即可实现对待测物品质的快速无损检测<sup>[4-6]</sup>。

随着计算机技术与化学计量学的不断发展,光谱分析技术逐步应用于食品、化学、石油、精细农业等多个领域。由于人们消费水平的提高,水果的品质检测也逐渐得到重视,光谱技术随即走向研究人员的视野。本研究通过使用可见近红外光谱分析技术对柑橘的内部品质进行检测,建立柑橘的水分和糖度预测模型,对收获的柑橘实现快速无损检测,进而实现分级销售,保证销售利益最大化。

## 1.2 国内外研究现状及分析

### 1.2.1 水果品质无损检测研究现状

在水果无损检测领域国内外专家学者做出了大量研究,目前常见的水果无损检测技术主要包括机器视觉检测、电子鼻检测、声波震动检测、电学参数检测、近红外光谱检测等方法,相较于传统人工检测,这些方法在检测准确率、速度上具有明显优势。

在基于机器视觉检测领域,杨涛<sup>[7]</sup>等人通过机器视觉法实现猕猴桃分级,首先采集猕猴桃外部照片,通过 K-means 算法识别猕猴桃表面是否存在碰伤、病变等缺陷,存在缺陷的果实直接判断为残次果,不存在病变的果实采用 SVM 分类算法依靠果实外部尺寸形状特征分为不同等级。该方法准确率较高,可为猕猴桃分级提供一种新思路。林海波<sup>[8]</sup>等人对苹果进行分级时,同样采用机器视觉法。在分别采集苹果顶部和正面图像后,提取出大小、形状、颜色、纹理、缺陷特征,将特征导入 SVM 分类模型实现苹果品质分级,并通过交叉验证法优化模型。最终将 61 个验证集样本导入模型分类,其准确率高达 96.27%,可满足苹果分级要求。

在基于电子鼻检测领域,丁庆行<sup>[9]</sup>等为解决水果在储存时出现腐烂问题,自主搭建了一套电子鼻装置,该装置主要工作部件由 8 个气体传感器组成,其可检测出水果腐烂时散发出的不同气体。将传感器采集的信息传递给信号采集卡由 LabVIEW 保存,采用 PCA 分析可将水果(火龙果、猕猴桃、梨、苹果)腐烂程度分为不同等级。张建超<sup>[10]</sup>等通过电子鼻实现苹果霉心病检测,借助 PEN3 型电子鼻采集不同程度霉心病以及健康苹果散发气体信息,建立 MLPNN、RBFNN、Fisher 模型分类。最终结果表明,健康果与病果散发出不同气体,MLPNN 模型分类效果最好,其建模集与预测集分类准确率分别高达 88.61%与 88.46%。

在基于电特性检测领域,李小龙<sup>[11]</sup>等为实现基于电特性检测库尔勒香梨重量,使用果品电学特性检测仪测量出库尔勒香梨六个电学参数,分别对不同参数与重量信息进行拟合,结果表明并联等效电容拟合拟合效果最好,并获得拟合方程。王若琳<sup>[12]</sup>等在检测苹果水心病时,使用日置 3532-50LCR 型测试仪采集苹果电学参数在不同频率范围内的特征值,利用 PCA 算法提取其主要信息,并建立 Fisher、MLP 神经网络、RBF 神经网络模型分类正常果与水心病,最终优化后的 MLP 神经网络模型分类准确率最高为 95.4%。

在基于声波振动检测领域,Khaled<sup>[13]</sup>等人通过自主搭建声波发射采集装置,采集正常苹果与被害虫侵害病果声波振动信号,并对采集到的振动信号降维至 21 个特征点,输入至多个分类模型,最终结果表明 KNN 与岭回归模型分类准确率最高为 99%。Morrison<sup>[14]</sup>等人在利用声波检测柑橘硬度时,使用其自主研发脉冲发生器采集柑橘反射振动信息,建立柑橘声波反射信息与密度关系模型,记录连续 9 天内柑橘硬度变化,最终结果表明该模型可以用来预测柑橘硬度。

## 1.2.2 水果品质近红外光谱检测国外研究现状

近红外光谱检测技术最早起源于国外,并伴随着计算机技术的飞速发展而广泛运用到食品、化学、石油、农业等多个领域。针对近红外光谱检测技术在水果品质领域,国外的科研人员针对其本土特有水果及国际市场大宗水果做出了大量研究。

水果糖度检测领域,Bobasa<sup>[15]</sup>对当地特有卡卡杜李果实四个不同部位进行近红外光谱采集,对得到的光谱图利用 PCA-PLS 建模分析其含有的可溶性固形物含量以及含水率,结果表明光谱的采集位置对其预测结果好坏有直接影响。Sulistyo<sup>[16]</sup>通过其自主研发设计手持式近红外光谱仪研究暹罗橙总可溶性固体(TSS)、维生素 C 含量以及酸度(pH),在获取样品的 6 个特征波长数据之后,通过简单回归、多元回归以及神经网络(BPNN)进行预测。结果表明,BPNN 模型预测性能较好,酸度和总可溶性固体预测平均绝对百分比误差(MAPE)<10%,维生素 C>10%。Khayelihle<sup>[17]</sup>通过获得 Valencia 橙和 StarRuby 葡萄柚光谱数据,对其总可溶性固体(TSS)、酸度(TA)进行检测。建立偏最小二乘(PLS)回归分析模型,预测结果表明,Valencia 橙子酸度预测结果决

定系数  $R^2$  为 0.958。葡萄柚的预测结果，总可溶性固体  $R^2$  为 0.896，酸度  $R^2$  为 0.858。Pourdarbani<sup>[18]</sup>发现可通过采集 800~900 nm 范围内的光谱数据用于预测苹果淀粉含量，使用 920~980 nm 范围内光谱数据预测苹果总可溶性固体含量，使用 ANN-BBO 模型对光谱数据进行分析预测。结果表明，预测淀粉的最佳训练结果回归系数为 0.97，可溶性固体含量的回归系数为 0.96，预测  $R^2$  均为 0.92。

水果硬度检测领域，Mishra<sup>[19]</sup>使用便携式可见近红外（VNIR）光谱仪预测单个芒果成熟硬度。在获得 400-1300 nm 波段光谱数据后，采用区间偏最小二乘（iPLSR）对光谱数据降维，结果表明，基于 IPLSR 的 PLSR 预测结果  $R^2$  为 0.75，RMSEC 为 5.92Hz2g<sup>2/3</sup>，预测性能较好。Kanchanomai<sup>[20]</sup>通过获得葡萄样品在实验室和田间的 400-1000 nm 波长范围光谱数据，采用偏最小二乘回归 PLSR 检测硬度指标。研究结果表明，采用 SGD1-PLSR 预测模型，硬度检测效果最优，其实验室预测决定系数  $R^2$  为 0.7427，田间预测  $R^2$  为 0.7804。Pourdarbani<sup>[21]</sup>对不同成熟度的富士苹果样品硬度、酸度和淀粉含量展开研究，偏最小二乘回归（PSLR）和人工神经网络（ANN）对各个阶段采集的苹果光谱数据进行分析预测。结果表明，ANN 模型预测硬度、酸度和淀粉含量效果较好，其相关系数分别为 0.947、0.827 和 0.969。

水果维 C 含量检测领域，Hemrattrakun<sup>[22]</sup>通过采集当地柿子的近红外光谱数据，建立维生素 C、SSC 和硬度检测的 PLS 模型。预测结果表明，PLS 模型难以预测 SSC 真实值，对于维生素 C 和硬度检测，采用正交信号校正（OSC）预处理，维生素 C 的预测结果  $R^2$  为 0.92，硬度预测结果为  $R^2$  为 0.89。Munawar<sup>[23]</sup>关于芒果可溶性固形物（SSC）和维生素 C 研究中，在获得 1000~2500 nm 光谱数据后，使用偏最小二乘回归（PLSR）预测模型，进行 10 折交叉验证。最终预测结果表明，芒果果实的 SSC 和维生素 C 可以同时测定，SSC 和维生素 C 最大相关系数分别为 0.88 和 0.87。

为检测水果总有机物占比，Passos<sup>[24]</sup>引入卷积神经网络 CNN 模型检测水果干物质，通过采集苹果、猕猴桃、芒果和梨近红外光谱，对比 PLS 模型和局部加权 PLS（LW-PLS）模型与优化后 CNN 模型预测结果。结果表明，CNN 模型预测准确率最高，同时混合水果 CNN 模型也表现出较强的预测和泛化能力。

针对品质指标联合检测，Funsueb<sup>[25]</sup>引入了一种新的水果内部品质评标指标，该指标将多个品质相关参数聚合在一起，包括 TSS、TA、pH、DM 等。新评价指标缩放后对应 0 到 100 的品质等级。采集芒果、橘子和鳄梨光谱数据建立 PLS 模型分析验证，结果表明该指标可用于水果内部品质检测，同时减少了多种品质参数分析过程。

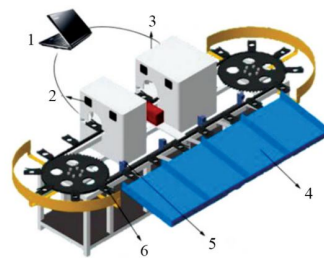
为判断榴莲不同成熟期，Ditcharoen<sup>[26]</sup>采集未成熟、早熟、成熟和成熟四个阶段榴莲样品头部、中部、尾部、茎部光谱数据，建立线性判别分析（LDA）、支持向量机（SVM）、k-近邻（KNN）模型进行分类识别不同成熟期。最终结果表明，当头部、中部、尾部光

谱采用 MA+基线偏移预处理，茎部光谱采用 MA+SNV 预处理时，LDA 模型对的分类精度为 100%，优于其他模型。

### 1.2.3 水果品质近红外光谱检测国内研究现状

相对于欧美一些国家，近红外光谱检测技术在中国起步较晚。但随着科研人员对这一领域的不断深入研究以及计算机技术的飞速发展，中国在水果无损检测的研究中也取得了不错的成果<sup>[27]</sup>。目前针对于水果品质的检测主要集中于可溶性固形物、酸度、糖度、维生素 C、硬度等几个方面。对比传统检测手段，近红外光谱技术可以实现对水果内部品质进行高效检测，同时不会破坏水果完整性，检测速度也大幅提高<sup>[28]</sup>。

水果糖度检测领域，郭志明<sup>[29]</sup>等开发了一种基于 LED 光源手持式苹果品质无损检测装置，该装置可通过物联网实现检测数据上传云端以及模型远程更新维护。通过采集苹果 500~1050 nm 光谱数据，经 SG 平滑，采用 UVE、GA、SPA、CARS 算法筛选特征变量建立 PLS 糖度预测模型，最终结果表明，CARS-PLS 模型预测性能最好，其预测相关系数为 0.926，均方根误差为 0.585%，可满足苹果现场检测实际需求。陈东杰<sup>[30]</sup>等设计出库尔勒香梨内部品质在线无损检测装置，其装置如图 1-2 所示，通过采集香梨 0.3 m/s、0.5 m/s 速度下光谱数据，探究速度对可溶性固形物含量预测模型的影响。分别建立 0.3 m/s、0.5 m/s 以及两种速度混合条件下 PLS 预测模型，研究结果表明，依靠 CARS 筛选出 32 个变量建立的混合速度 PLS 预测模型，预测效果最好，其预测集相关系数和预测均方根误差分别为 0.915 和 0.371° Brix，可为果品品质在线检测提供参考。



1.电脑 2.工业相机 3.光谱仪 4.分级托盘 5.分级操作杆 6.水果托盘

图 1-2 香梨内部品质在线无损检测装置

Fig.1-2 Fragrant pear internal quality on-line non-destructive testing device

朱文杰<sup>[31]</sup>等开发了手持式黄油桃可溶性固形物检测装置，如图 1-3 所示，在实验室环境下，采集黄油桃样本 680~940 nm 区间内的可见近红外光谱数据，对光谱数据进行平滑、最大值归一化后建立黄油桃 SSC 偏最小二乘回归模型，预测集相关系数为 0.947，均方根误差为 0.732%。结果表明该设备具有广阔的应用前景。



图 1-3 手持式光谱采集装置

Fig.1-3 Handheld spectrum acquisition device

刘燕德<sup>[32]</sup>等采用漫透射方法检测苹果可溶性固体 (SSC) 时, 为探究光源最佳照射位置, 购得两批苹果样本, 分别照射苹果正上部与斜上部采集光谱数据。研究表明, 基于照射苹果上部时采集数据建立 MSC-PLS 模型预测效果较好, 其 RMSEC 值为 0.22644, RMSEP 值为 0.3015,  $R_c$  为 0.9669,  $R_p$  为 0.9499, 准确率较高, 可为后续研究提供参考。樊书祥<sup>[33]</sup>等开发了一款基于单片机、LabVIEW 手持式水果糖度检测装置, 采集实验室与果园环境下苹果与大桃 600~950 nm 光谱数据, 分别建立 PLS 模型, 将基于实验室数据建立的模型应用于果园数据, 其预测集相关系数与均方根误差分别为 0.866、0.816、0.741%、0.627%, 满足现场检测要求。张小斌<sup>[34]</sup>等采用 Sunforest H100 (自建模型) 装置检测水蜜桃糖度时, 以 3 个品种水蜜桃为研究对象, 分析结果表明, 不同品种水蜜桃检测准确率不同, 其相关系数分别为 0.98、0.96、0.92, 混合品种模型预测相关系数为 0.92, 可实现多品种混合检测。蔡建荣<sup>[35]</sup>等开发了一种手持式柑橘可溶性固形物含量无损检测装置, 该装置通过采集柑橘 541.83~899.40 nm 波段光谱数据建立 1D-CNN 模型, 对比 PLS、SVM、ANN 模型, 1D-CNN 模型预测性能最优, 其预测相关系数和预测均方根误差分别为 0.812, 0.488, 满足柑橘可溶性固形物含量检测需求。刘燕德<sup>[36]</sup>为消除脐橙尺寸差异对糖度分析带来的影响, 通过采集脐橙漫透射、多点发射与接收及环形发射与接收漫反射光谱, 并针对大果、小果、混合果分别建立糖度预测模型, 研究表明, 经过多元散射校正预处理光谱后, 漫透射光谱的混合果模型精度最优, 模型预测集相关系数为 0.84, 预测集均方根误差为 0.64° Brix。

水果酸度的检测领域, 张云琪<sup>[37]</sup>等为检测苹果酸度, 搭建透射光谱采集装置采集“黄金帅”品种苹果可见近红外光谱数据, 经 PXY 算法划分样本集, 并对数据进行平滑+小波变换处理, 通过 SPA、CARS、SPA-CARS、与其提出新的方法降维处理, 结果表明其提出的新的降维方法降维后数据输入 PLS 模型预测准确率最高, 相关系数为 0.9776。李旭晨<sup>[38]</sup>通过搭建静态可见近红外光谱数据采集装置 (如图 1-4 所示), 在采集烟台红富士苹果 400.42~1100.11 nm 光谱数据后, 经不同方法预处理以及多种降维方式建立 PLS、SVR、RF 定量分析模型。实验结果表明, 经 D1+KS+CARS 处理后建立 PLS 模型预测酸度效果最好, 其相关系数为 0.93, 均方根误差为 0.04。